水氮耦合对辣木幼苗根系形态特征的影响[1]

何至杭[1]，刘丽[2]，彭钟通[3]，陈铁群[3]，王艺颖[1]，刘悦[1]，曾曙才[1]，莫其锋[1*]

（1. 华南农业大学 林学与风景园林学院，广州 510642；2. 梅州市农林科学院林业研究所，广东 梅州 514011；3. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所，北京 100091）

摘　要：辣木（*Moringa oleifera*）主要分布在热带地区，属落叶乔木，具有极高的经济价值和栽培用途。为探究 12 种水氮组合处理对辣木根系形态的影响，该文共设置 3 种土壤水分梯度，包括 40%（W1）、60%（W2）、80%（W3）的田间饱和持水量，以及 4 种施氮水平 N0(0 g·株$^{-1}$)、N1(0.6 g·株$^{-1}$)、N2(1.8 g·株$^{-1}$)、N3(3.6 g·株$^{-1}$)，比较不同水氮组合处理对辣木幼苗粗根和细根性状（根长度、根表面积、根体积、根平均直径、比根长、比表面积等）的影响。结果表明：（1）水处理对辣木幼苗粗根和细根的性状没有显著影响。（2）氮处理对粗根的根长、根表面积、根体积、根平均直径和比表面积有显著影响，而仅显著影响了细根的平均直径和比表面积。（3）两因素方差分析表明，水氮交互作用仅显著影响了细根根长；在相同的水处理下，低氮促进而高氮则抑制辣木粗根和细根根长、根表面积和根体积的增加，表明低氮中水和低氮高水处理在一定程度上促进根系生长。该研究结果表明，单一水处理的差异并没有显著改变辣木根系特性；低氮促进而高氮抑制辣木根系的生长，且辣木粗根对氮处理的响应更敏感。水氮耦合对辣木根系生长有明显的调控作用，低氮中水或低氮高水的组合模式更利于辣木根系生长。因此，为提高速生辣木的生长及生物量的累积，在生产上应严格控制水和氮的使用量，严格水肥组合配比，有效提高水和氮肥的利用效率。

关键词：水氮耦合，根系特征，施肥，栽培树种，热带

中图分类号：Q945　　　　**文献标识码：**A　　　　文章编号：

Coupling effects of water and nitrogen fertilization on root morphological characteristics of *Moringa oleifera* seedlings

HE Zhihang[1], LIU Li[2], PENG Zhongtong[3], CHEN Yiqun[3], WANG Yiying[1], LIU Yue[1], ZENG Shucai[1], MO Qifeng[1,*]

（1. *College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University*, Guangzhou 510642；2. *Forestry Research Institute of Meizhou Academy of Agricultural and Forestry Sciencese*, Meizhou 514011, Guangzhou, China；3. *Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry,* Beijing 100091, China）

Abstract： *Moringa oleifera* is a perennial tropical deciduous tree species, which has high economic value and cultivation purpose. In order to investigate the effects of different water (W) and nitrogen (N) additions on the root growth and traits of *Moringa oleifera*, we explored the response of root growth (e.g., root length, surface area, volume and average diameter of coarse and fine roots) of *Moringa oleifera* seedlings to the coupling of different soil water and nitrogen availability. There were three soil W gradients including 40% (W1), 60% (W2), 80% (W3) of field saturated water capacity (SWC), and four N application levels N0 (0 g·plant^{-1}), N1 (0.6 g·plant^{-1}), N2 (1.8 g·plant^{-1}), and N3 (3.6 g·plant^{-1}). The results were as follows: (1) W treatment had no significant effects on the coarse and fine root traits; (2) N treatment significantly affected the coarse root length, surface area, volume,

收稿日期：2022-03-13

基金项目：广东省林业科技创新专项资金（2015KJCX009）[Supported by Special Fund for Forestry Science and Technology Innovation of Guangdong Province（2015KJCX009）]。

第一作者简介：何至杭（2000 年-），本科生，主要研究方向为植物生理生态学，（E-mail）982340745@qq.com。

***通信作者：**莫其锋，博士，硕士生导师，研究方向为植物生理生态学，（E-mail）moqifeng@scau.edu.cn。

chinaXiv:202205.00007v1

ChinaXiv合作期刊

average diameter and specific root area (SRA), while only significantly influenced fine root average diameter and SRA; (3) the Two-way ANOVA demonstrated that the interaction between W and N only dramatically affected fine root length; under the same W treatment, low N promoted but high N suppressed the coarse and fine root length, surface area and volume, suggesting that the coupling of low N with medium W, or low N with high W to some extent promoted the root growth. The study indicates that single W treatment does not change the root traits, low N promotes but high N inhibited the root growth, and the coarse root are more sensitive to N application than fine root thus the coupling of W and N can obviously regulate the root growth of *Moringa oleifera*. Therefore, in order to promote the growth and biomass accumulation of *Moringa oleifera*, the water and nitrogen availability should be restrained and effectively enhance the water and nitrogen efficiency in practices.

Key words: coupling of water and nitrogen, root traits, fertilization, cultivated species, tropics

在生产上，水分和氮肥两个因子的相互作用下，共同对作物的生长发育以及对资源利用效率产生影响的现象，称为水氮耦合(姚锋先，2011)。研究表明，提高作物的水氮利用率和产量水平有助于合理利用农业资源；合适的氮素水平有利于作物吸收和利用土壤水分，提升水分利用效率(谢志良和田长彦，2011)。施加氮素对作物根系呼吸及形态会产生显著的影响(Li, et al.，2015)。有研究发现水分和氮素在藜麦（*Chenopodium quinoa*）的生长过程有协同作用，合适的灌溉量可以促进氮肥的吸收，进而显著提高藜麦的产量、干物质累积和氮素累积(王斌等，2020)；合适的水氮添加可以提高马铃薯（*Solanum tuberosum*）的产量及商品率，并且可以提高土壤的酶活性(王顺等，2021)；对于棉花（*Gossypium* spp）而言，合适的灌溉量以及施肥量在一定程度上可以促进其植株的生长和产量的增加，对于株高、叶片数和结铃率等指标都有提高效应(尔晨等，2021)；一定的水氮配比可以降低生育期菘蓝（*Isatis indigotica*）的耗水量，改善水和氮在作物-土壤水分系统中的良性循环(王玉才等，2021)。作为植物获取水分和养分的主要器官，根系对于作物生长有至关重要的作用(王玉才等，2021)，因此加强对不同浓度水氮耦合对作物根系生长影响的研究，有助于了解植物在不同水氮条件的响应机理，以及寻找植物的最适水和氮的组合方式，作为植物栽培实践的指导方案。

辣木（*Moringa oleifera*），主要生长在热带地区，其叶片和果荚含有各种有益成分，种子含有的活性凝结成分可以净化水质(饶之坤等，2007)。近年来，辣木的营养成分以及药理作用研究取得了良好进展，其中，辣木叶的醇提物具有自由基清除能力(周伟等，2017)，并且辣木叶在饲料应用、食品领域以及医疗应用有广阔前景(巩思佳等，2021)。由于辣木具有重要的经济价值和实用价值，辣木的栽培技术也变得日益重要。鉴于辣木产业在我国的迅速发展，不同栽培以及管理方式下辣木对养分需求的极大差异(程世敏等，2021)，目前对辣木栽培的研究主要集中在氮磷钾的施用(程世敏等，2021；李玲等，2015)、遮光处理(袁淑娜等，2021)、水胁迫(任保兰等，2021)对辣木生长的影响，以及对辣木光合作用特征的探讨(魏安超和张大为，2021)等。根系是植物营养和水分吸收的重要器官，而在氮肥和水的耦合效应对辣木生长影响方面的研究较为缺乏，两者对辣木根系特征影响的研究更少。本研究以华南季风区为研究区域，以辣木为研究对象，采用盆栽试验，设置不同的土壤水分和施氮梯度，通过设定不同的水氮组合处理探讨这些处理对辣木生长的影响，并分析辣木根系生长状况和形态结构对不同水氮耦合处理的响应特征，拟回答以下科学问题：（1）不同水分梯度和施氮梯度是如何影响辣木根系生长和结构特征？（2）如何通过合适的水氮组合改善辣木根系的生长？本文的研究结果将为改善辣木根系生长状况提供数据支持，为华南地区辣木的水氮管理和合理栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究的盆栽实验设在广州市天河区华南农业大学生态学教学基地（113°21′26″E，23°9′26″N）。该区域处于南亚热带季风气候区，年平均温度为 21.8 ℃，年降水量为 1 638 mm，降水集中于每年的 4—9 月，占年降水量的 80%，热量充足(吴永彬和冯志坚，2006)。

1.2 实验材料

本研究中选用的辣木品种为 *Moringa oleifera* ‘PKM Ⅰ’，挑选光亮饱满的种子在自来水中浸泡 6 h，放

chinaXiv:202205.00007v1

置晾干后将种子播种于盛有干净河沙的托盘中，待萌芽后生长 7～10 d，选择生长状况良好，且长势基本一致的幼苗，将其转移到盛有培育基质的花盆中，花盆规格为 30 cm（上口径）×30 cm（下口径），高 26 cm，每个花盆内仅栽培 1 株幼苗。试验中选用的氮肥为尿素($(CO(NH_2)_2$，含 N 46.0%）。栽培基质为赤红壤与营养土混合物，两者比例为 7∶1，每个花盆盛有的基质均为 4 kg。混合后测定基质中有机质含量为 48.73 $g·kg^{-1}$，全氮含量为 1.36 $g·kg^{-1}$，全磷含量为 0.25 $g·kg^{-1}$。盆栽试验所用的赤红壤挖自华南农业大学树木园表层土壤（深度为 0～20 cm），将土样混合后自然风干，除杂、研碎后过 3 mm 的网筛。经实验测定，该红壤的田间持水量为 25%，与华南地区壤土田间持水量相近(韩学琴等，2018；劳同浩等，2013)。试验中，将不同处理的盆栽苗随机地摆放在温室大棚的高 0.8 m 铁架上进行，大棚内空气流通，光照强度、空气温湿度等环境条件与外界相似。控制变量仅为水和氮的添加量不同，其他处理均保持一致。

1.3 实验设计

根据本地区的降雨量、农作物施氮量并结合相关试验的施氮水平(彭钟通等，2021)，本研究采用水氮组合处理，设置 3 个水分梯度，包括 40%（W1）、60%（W2）、80%（W3）田间饱和持水量，以及 4 个氮水平，包括 0 $g·株^{-1}$（N0）、0.6 $g·株^{-1}$（N1）、1.8 $g·株^{-1}$（N2）、3.6 $g·株^{-1}$（N3），共组合成 12 种处理，每个处理设置 6 个重复。

盆栽试验自 2017 年 6 月 9 日启动，根据土壤基质的饱和含水量、试验设计的水处理梯度和氮处理梯度，分别计算好每种处理所需的水和氮的量，并将氮溶解与相应处理添加的水中，保证水分梯度达到设计的百分比，施用频率为每两周一次，每株植物施用量如下表所示（表 1）。试验过程中，对辣木进行常规的日常管理工作，180 d 后，收获所有盆栽的根系，然后进行根系扫描及数据数据。

表 1 实验处理设置

Table 1 Experimental processing settings

处理 Treatment	水处理 1 W1			水处理 2 W2			水处理 3 W3		
	加水量 Added water（mL）	施氮量 Added nitrogen（g）	尿素溶液 Urea solution（mL）	加水量 Added water（mL）	施氮量 Added nitrogen（g）	尿素溶液 Urea solution（mL）	加水量 Added water（mL）	施氮量 Added nitrogen（g）	尿素溶液 Urea solution（mL）
氮处理 0 N0	120	0	0	350	0	0	600	0	0
氮处理 1 N1	100	0.6	20	330	0.6	20	580	0.6	20
氮处理 2 N2	60	1.8	60	290	1.8	60	540	1.8	60
氮处理 3 N3	0	3.6	120	230	3.6	120	480	3.6	120

1.4 测定项目和方法

1.4.1 根系测定

细根（<2 mm）是水分和养分吸收的主要器官，而粗根（>2 mm）则是生物量的主要组成部分。本试验中，将收获的辣木从茎基部剪断，尽量保持根系的完整，仔细挑出残留在土壤中的根系，然后把全部根系装入袋中，避免根的水分蒸发，立即带回实验室清洗干净。再将根系按直径大小区分为细根和粗根，分别铺在吸湿纸上，使根系平展，之后使用 LA-S 植物图像分析仪对根系进行扫描，得到每株辣木幼苗粗根和细根的根长、根表面积、根体积等指标。将扫描好的粗根和细根分别放入牛皮纸袋，在电热恒温鼓风箱中，烘干至恒重后进行称重，重量精确到 0.01 g。

chinaXiv:202205.00007v1

1.4.2 根系指标计算

结合实验中测得粗根和细根的根长和根表面积，进而计算得到辣木的比根长和比表面积，具体公式如下：

$$比根长（cm\cdot g^{-1}）=\frac{根长（cm）}{根干重（g）}$$

$$比表面积（cm^2\cdot g^{-1}）=\frac{根表面积（cm2）}{根干重（g）}$$

1.5 数据处理

所有图表利用 Excel 2016 进行数据整理并绘制，使用 SPSS 26.0 进行单因素方差和双因素方差分析。在检测相同 N 处理不同水处理间的各根系参数间差异以及相同水处理下不同 N 处理的各根系参数间差异时，使用 One-way ANOVA；检测氮和水之间的交互作用时，使用双因素方差分析（Two-way ANOVA），显著水平设定为 P=0.05。

2 结果分析

2.1 水氮耦合对辣木根长的影响

本研究发现，氮处理对辣木幼苗粗根根长有显著影响，但水处理和两种处理间的交互作用对辣木幼苗粗根根长无显著影响（表 2）。在低水（W1）处理下，辣木的粗根根长在 N1 处理下达到最大值，为 158.30 cm，显著高于其它 3 种处理（图 1: a）。而在中水（W2）处理下，N2 处理的细根长度最大，分别是 N0、N1 和 N3 处理的 154.3%、194.1%和 161.0%，并且粗根和细根的根长随着施氮浓度的增加出现先上升后下降趋势（图 1）。在高水（W3）处理下，粗根根长在 N1 和 N2 的处理下显著高于 N0 处理（图 1: a），分别达到 148.79 cm 和 149.79 cm，并且 N1 和 N2 处理之间无显著差异。

水和氮的交互作用对辣木幼苗细根根长有显著影响（表 3）。在 N2 处理下，W2 和 W3 显著大于 W1，并且在 W3N2 处理下，细根长度达到最大值，为 1 734.33 cm。细根长度在 N0 处理下随水量的增加而减少，而在 N2 和 N3 处理下，细根长度随施水量增加而增加（图 1: b）。

表 2 水和氮处理对辣木幼苗粗根根长、根表面积、根体积、根平均直径、比根长和比表面积影响的双因素方差分析结果

Table 2 Effects of water and nitrogen treatment on coarse root length, root surface area, root volume, average root diameter, specific root length and specific surface area of *Moringa oleifera* seedlings

种类 Type	水处理 Water-treatment		氮处理 Nitrogen treatment		水处理×氮处理 Water × nitrogen treatment	
	F	P	F	P	F	P
根长 Root length (cm)	0.196	0.823	10.613	*0.000*	2.069	0.070
根表面积 Root surface area (cm²)	0.329	0.721	8.635	*0.000*	1.309	0.267
根体积 Root volume (cm³)	0.274	0.761	6.051	*0.001*	0.891	0.507
根平均直径 Root average diameter (mm)	0.403	0.670	7.925	*0.000*	0.354	0.905
比根长 Specific root length	2.138	0.127	1.651	0.187	0.823	0.557

chinaXiv:202205.00007v1

(cm·g-1)						
比表面积 Specific root area (cm²·g-1)	3.762	*0.029*	5.504	*0.002*	1.065	0.394

注：斜体数字表示存在显著差异

Note: The italic figures indicate significant differences

表 3　水和氮处理对辣木幼苗细根根长、根表面积、根体积、根平均直径、比根长和比表面积影响的双因素方差分析

Table 3 Effects of water and nitrogen treatment on fine root length, root surface area, root volume, average root diameter, specific root length and specific surface area of *Moringa oleifera* seedlings

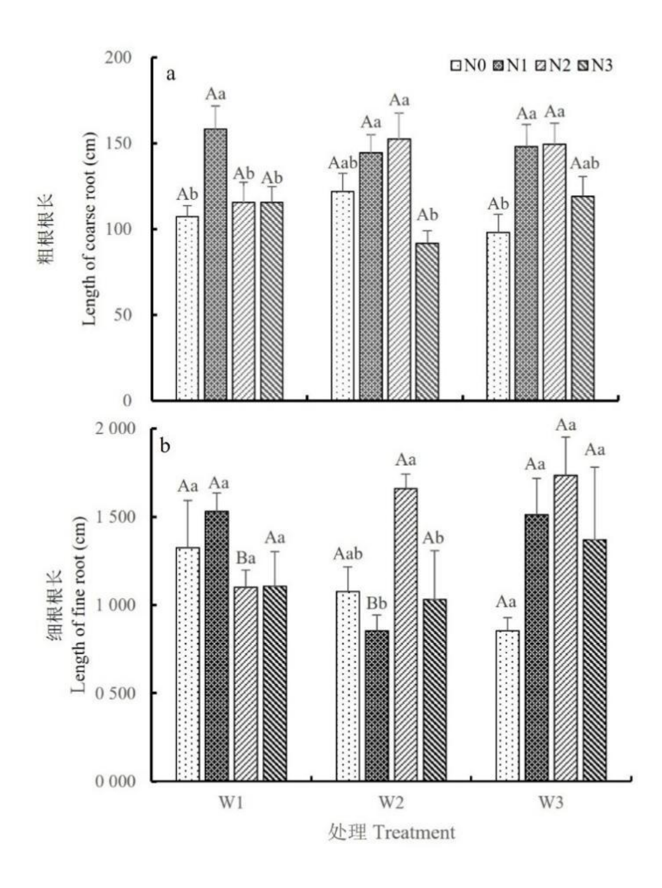
种类 Type	水处理 Water-treatment		氮处理 Nitrogen treatment		水处理×氮处理 Water × nitrogen treatment	
	F	P	F	P	F	P
根长 Root length (cm)	1.028	0.364	2.180	0.100	2.358	*0.041*
根表面积 Root surface area (cm²)	1.864	0.164	1.670	0.183	2.010	0.079
根体积 Root volume (cm³)	2.706	0.075	1.533	0.215	1.762	0.123
根平均直径 Root average diameter (mm)	0.458	0.635	5.572	*0.002*	0.812	0.565
比根长 Specific root length （cm·g-1)	0.282	0.755	1.126	0.346	1.024	0.419
比表面积 Specific root area (cm²·g-1)	0.137	0.872	3.181	*0.030*	0.752	0.611

注：斜体数字表示存在显著差异。

Note: The italic figures indicate significant differences.

chinaXiv:202205.00007v1

chinaXiv:202205.00007v1



不同小写字母表示相同水处理下不同氮添加的显著差异（*P*<0.05）；不同大写字母表示相同氮处理下不同水添加的显著差异（*P*<0.05）。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different nitrogen additions under the same water treatment (*P*<0.05); Different capital letters indicate significant differences among different water additions under the same nitrogen treatment (*P*<0.05). Tha same as below。

图 1　水氮耦合对辣木粗根和细根根长的影响

Fig. 1 Coupling effects of water and nitrogen addition on the length of coarse root and fine root of *Moringa oleifera*

2.2 水氮耦合对辣木比根长的影响

水或氮的施加对粗根和细根的比根长无显著影响（表 2 和表 3）。在 W2 和 W3 处理下，粗根的比根长（specific root length，SRL）随施氮量增加均先减少后增加，且都在中氮（N2）处理下达到最小值。W1 处理下，N0 下粗根比根长显著低于其他 3 种处理，仅为 20.56 $cm \cdot g^{-1}$，而 N1、N2 和 N3 处理之间则无显著差异（图 2: a）。另外，细根的比根长随水梯度或氮梯度的变化均无显著差异（图 2: b）。

chinaXiv:202205.00007v1

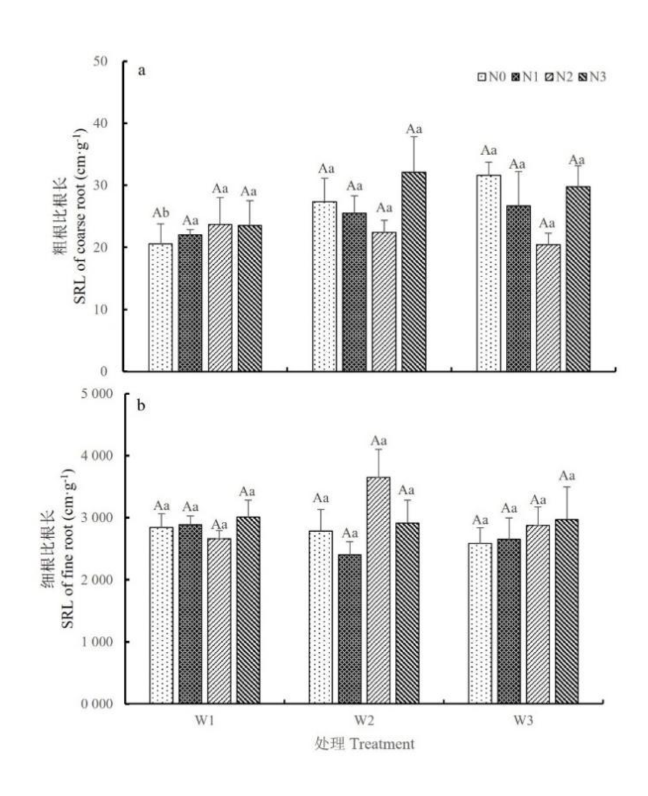


图 2　水氮耦合对辣木粗根和细根比根长的影响

Fig. 2 Coupling effects of water and nitrogen addition on the specific root length (SRL) of coarse root and fine root of *Moringa oleifera*

2.3 水氮耦合对辣木根表面积的影响

氮处理显著影响辣木粗根的根表面积（表 2）。在 W1 和 W3 处理下，辣木粗根与细根的表面积随氮添加量的增加而呈现先升高再降低的趋势，且在 N1 处理下达到最大值（图 3），粗根表面积分别为 316.95 cm^2 和 348.96 cm^2，显著高于其余氮处理，细根则为 245.88 cm^2 和 248.37 cm^2。在 N3 处理下，三种水处理中粗根的表面积均最小（图 3: a）。

在 N1 处理下，辣木细根表面积随水量增加先降后升，而在 N2 和 N3 处理下，细根表面积随施水量增加而呈现上升趋势（图 3：b），且在 W3N2 处理下细根表面积达最大值 273.72 cm^2。在 W2 下，N2 处理下的表面积为 247.98 cm^2，显著高于 N1 处理。W1 和 W3 处理下氮添加对细根表面积并无显著差异。在 N2 处理下，W1 水处理的根表面积显著低于 W2 和 W3 处理，仅为 W2 和 W3 处理的 75.5%和 68.4%（图 3: b）。

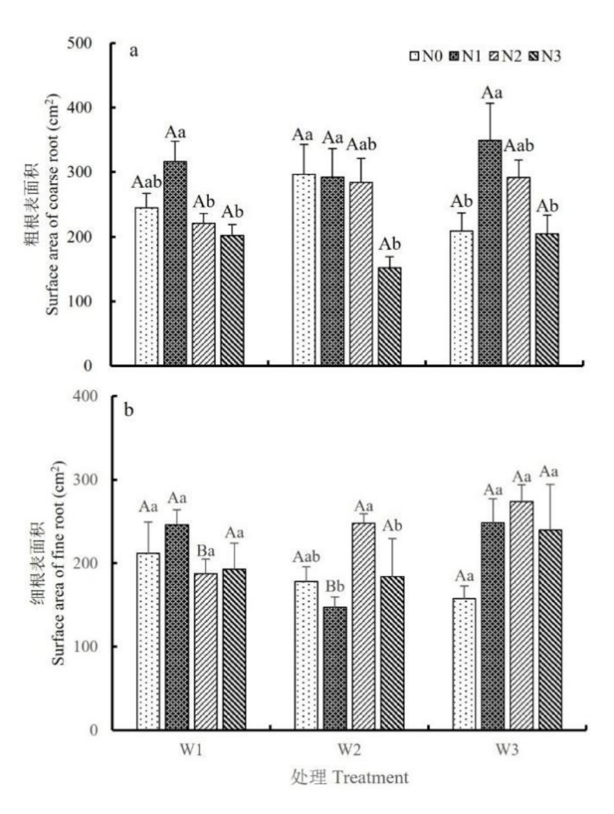


图 3　水氮耦合对辣木粗根和细根表面积的影响

Fig. 3 Coupling effects of water and nitrogen addition on the surface area of coarse root and fine root of *Moringa oleifera*

2.4 水氮耦合对辣木根系比表面积的影响

水和氮处理对粗根的比表面积（specific root area, SRA）有显著影响，但两因子间的相互作用并不显著（表 2）。粗根比表面积基本都呈现先减后增的趋势，粗根在 W2 处理下，N0 处理的比表面积显著高于其他 3 种处理，为 62.21 $cm^2 \cdot g^{-1}$，N2 处理也显著低于 N1 和 N3 处理，仅为 N1 处理的 66.6%。在 W3 处理下也表现出相似的趋势，N0 处理下比表面积达到最大值，并随着施氮量增加先减后增，在 N2 处理下达到最小值 39.79 $cm^2 \cdot g^{-1}$。在 N1 处理下，粗根比表面积随着施水量的增加而增加，W2 和 W3 处理下根比表面积为 52.11 $cm^2 \cdot g^{-1}$ 和 55.45 $cm^2 \cdot g^{-1}$，高于 W1 的 43.92 $cm^2 \cdot g^{-1}$，而在 N2 氮处理下，W1 水处理的比表面积为 43.64 $cm^2 \cdot g^{-1}$，高于 W2 和 W3 处理（图 4: a）。氮处理对细根比表面积有显著影响（表 3），细根比表面积在 W2 和 W3 处理下表现为先下降后上升趋势，但不同水处理和氮处理下并无显著区别（图 4: b）。

chinaXiv:202205.00007v1

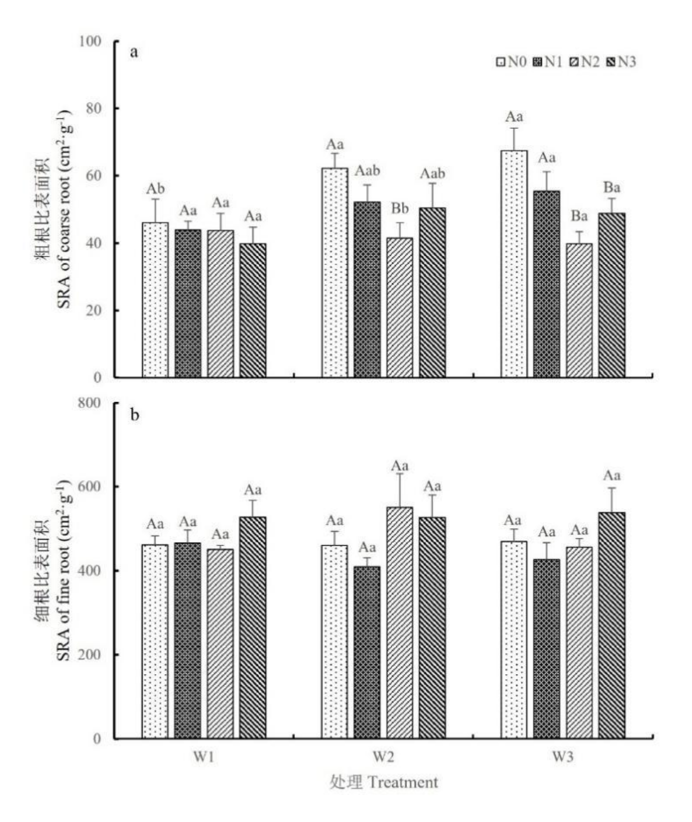


图 4　水氮耦合对辣木粗根和细根比表面积的影响

Fig. 4 Coupling effect water and nitrogen addition on the specific root area (SRA) of coarse root and fine root of *Moringa oleifera*

2.5 水氮耦合对辣木根体积的影响

氮处理对辣木幼苗粗根体积有显著影响（表 2），在 W1 和 W3 处理下，辣木粗根的体积随着氮添加量的增加而呈现先升高再降低的趋势，并于 N1 达到最大值。W1 条件下 N1 处理下，粗根体积为 95.63 cm^3，显著高于其余三种氮处理，N3 处理显著低于其余处理，N0 和 N2 处理下粗根体积并无显著区别。而在 W2 处理下，粗根的体积随氮添加量的增加而出现减少的趋势。粗根在 W1 处理下，N1 处理的而在 W2 处理下粗根体积随着施氮量的增加呈现降低趋势，N0 处理的粗根体积最大，且显著高于 N3 处理（图 5: a）。

W3 条件下，辣木细根体积在 N0 处理低于其他处理，在 N2 下达到最大值 5.79 cm^3，显著高于 N0。N1 处理下，随着水量的增加细根体积先减少后增加，并且 W2 处理下，N1 的细根体积显著低于 W1 和 W3 两组处理，仅为 3.57 cm^3。而在 N2 处理下，细根体积在 W3 处理下达最大值，并且具有显著性（图 5: b）。

chinaXiv:202205.00007v1

chinaXiv:202205.00007v1

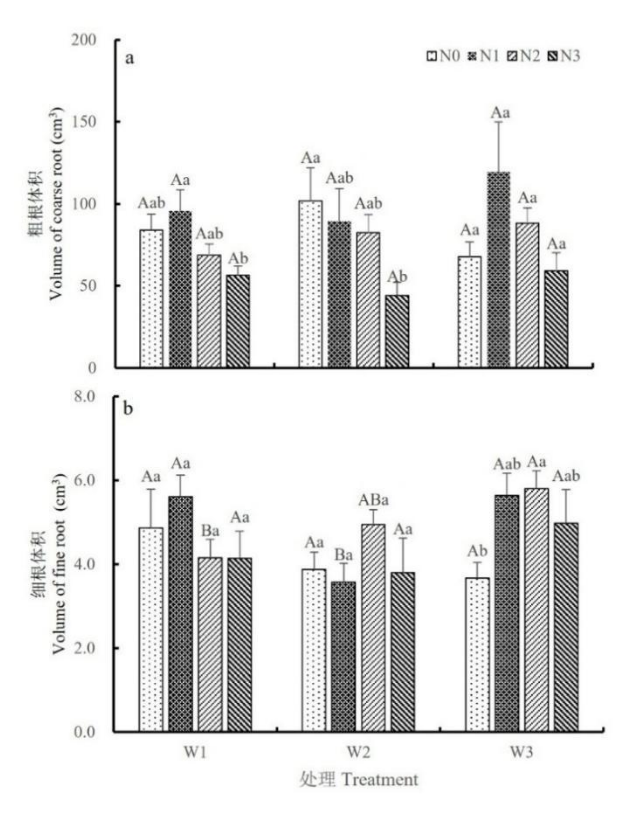


图 5　水氮耦合对辣木粗根和细根体积的影响

Fig. 5 Coupling effects of water and nitrogen addition on the volume of coarse root and fine root of *Moringa oleifera*

2.6 水氮耦合对辣木根平均直径的影响

氮处理对辣木幼苗粗根和细根的平均直径有显著影响（表 2、表 3）。在 W1 和 W2 处理下，粗根的平均直径随着施氮量的增加而减少（图 6: a）。而在 W2 处理下，N0 处理的粗根平均直径达最大值，为 4.64 mm，并且显著大于 N3 处理，而 N1 和 N2 氮处理并无显著差别，N3 处理下平均直径最小，仅为 N0 的 71.3%（图 6: a）。而在 W3 处理下，低氮添加（N1）下粗根平均直径最大，为 4.81 mm，且显著高于 N3 处理。

细根平均直径在 W1 处理下随着施氮量的增加而增加但处理间无显著差异，在 W2 和 W3 水处理下，细根的平均直径随施氮量的增加先减少后增加，W2 下，N2 氮处理的细根平均直径显著低于 N3 处理，仅为 0.44 mm（图 6: b）。

chinaXiv:202205.00007v1

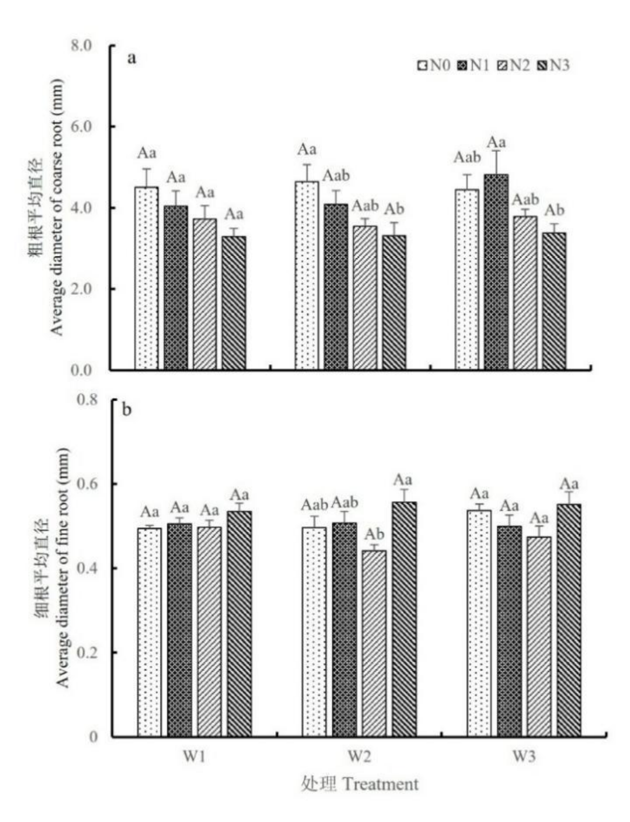


图 6　水氮耦合对辣木粗根和细根平均直径的影响

Fig. 6 Coupling effects of water and nitrogen addition on the average diameter of coarse root and fine root of *Moringa oleifera*

3 讨论

3.1 水氮耦合对辣木根系特征影响

水和氮对于植物生长的影响存在一定耦合关系(戴明和郭海滨，2020)。研究表明，辣木更适合生长在含水量较高的土壤中，75%以上的田间持水量更有利于辣木生长(韩学琴等，2018)。本研究中，从双因素方差分析可以发现，水氮之间的交互作用能显著影响辣木细根的根长与根表面积，高水条件以及中氮（N2）添加对于辣木根长的增加有利，粗、细根在中高水条件下的根长都在 N2 处理下达最大值；而高水低氮添加则会使粗根表面积、体积和平均直径都增大，并且粗根的表面积、体积以及平均直径均优于其他处理，且在高水（W3）条件下，辣木粗、细根的表面积和体积都呈现先增加后减少的趋势。另有研究发现，红小豆（*Phaseolus angularis*）在田间持水量的 35-40%和 75-80%处理下，其表面积也随着施氮量增加先增后减(李鑫，2016)，该趋势在高水分（W3）土壤下更为明显。这表明土壤适当的水分含量有助于辣木根系对氮的吸收，对根系生长有促进作用；并且在水分胁迫下，增施氮肥对辣木幼苗根系生长也有一定促进作用。

3.2 氮添加对辣木根系特征影响

细根是植物吸收水分和养分的主要器官，根长与根表面积的大小可以衡量植物对于土壤中养分以及水分的吸收程度(史顺增等，2017)。本研究中，在各土壤水分处理梯度下，低氮（N1）水平对于辣木细根表面积、体积大于无氮（N0）和高氮（N3），适量的氮添加以及高水处理对于细根根长都有促进作用，但粗细根的比根长和比表面积在中水（W2）和高水（W3）以及低氮（N1）和中氮（N2）则低于其余处理，这表明低氮（N1）添加有利于辣木的粗根的生长。有研究表明，适量的氮素施加对白桦树(*Betula platyphylla*)的根系生长有促进作用(刘福妹等，2015)。另外，红砂（*Reaumuria soongorica*）在低氮水平能更好地利用土壤中的氮素，根系的生长状况也相对较好，这证明了在一定的水分条件下，适量的氮素添加可以改善植物根系的生长状况，并且粗根的平均直径在各水分条件下均随氮素添加量的增加而减少(白亚梅等，2020)。本研究表明，适量的氮素添加有利于辣木细根表面积和体积的增长，但对粗根的生长有一定的抑制作用，与樟子松（*Pinus sylvestris*）幼苗在低氮添加下细根总长度和总表面积等指标呈现正效应的情况相似(郝龙

飞等，2021)。

之前的研究发现，在中和高水条件下辣木地下生物量也呈现出随氮素增加而先增后减的结果，地上部分叶、枝、茎的生物量在不同水添加条件下也呈现相同变化趋势。因此，一定范围水氮耦合作用对于地下生物量的增加有正的效应，而超过一定氮浓度则会抑制辣木根系生长(彭钟通等，2021)，表明在 N2 的氮水平下更利于辣木总生物量的积累。

适量氮添加能促进植物根系生长，但粗根和细根所适应的氮浓度并不相同。在对玉米（*Zea mays*）根系的研究中发现，低氮水平对于玉米根前期的生长有促进作用，但是在后期则会加速根的衰亡(彭涛涛等，2014)。本研究中，在中水（W2）和高水（W3）处理条件下，辣木根长、表面积和体积这 3 个指标上，粗根的峰值大多出现在低氮（N1）处理条件下，而细根的峰值大多出现在中氮（N2）处理中，说明辣木的粗根和细根所适应的氮素水平并不一致，同时也说明细根在某些指标上对氮施加的敏感性低于粗根，这可能是偏高的氮水平导致辣木粗根的衰亡。氮素对于根系的影响是另一个原因是，氮素可能会导致根际土壤 pH 下降，使土壤酸化，这可能会影响植物对营养的吸收利用(王文娜等，2016；戴明和张一敏，2020)。另外，其他研究表明，适量的氮处理可以提高植物呼吸作用相关酶的活性，适合的氮素浓度有利于促进植物根系呼吸(李春萍等，2019)，因而促进植物根系的生长。但是，过高的氮素会抑制相关酶活性，进而影响氮素的代谢，导致氮素的利用率的降低(孙永健等，2009)，对植物根系生长产生抑制作用。施氮量过多也会导致根系生长受到的抑制作用增强(郝龙飞等，2021)。对于辣木的生长而言，低氮（N1）添加使得土壤中氮素属于辣木的可承受范围内，合适的 pH 范围能够保持和提升土壤肥力，增加辣木根系对养分的利用效率；并且在中高水条件下，低氮处理的粗根各项指标较好，中氮处理更利于细根生长，说明中或高水分条件配合中低氮水平对于辣木根系生长更有利。因此，在华南地区红壤的辣木幼苗栽培工作上，更适宜选用高水处理以及低氮水平（N1）使辣木幼苗的根系生长；而中氮水平（N2）则更适合在细根生长阶段施用，并且对于生物量的积累更加有利。

3.3 水添加对辣木根系特征影响

研究发现，当植物面临水分减少的胁迫时，植物会选择增加细根的根长与表面积以增加水分吸收(Metcalfe et al.，2008)。本研究中，在 N1 处理下，细根的根长与表面积随着施水量的增加而增加，与前述结果一致。比根长（SRL）和比表面积（SRA）是植物根系对于水分和养分的吸收能力以及竞争力的直观反映(吴帆等，2022；Yoshimura et al.，2007)，也是指示根系形态功能的重要指标，二者可以在一定程度上反映植物对环境资源的获取能力及对生态环境的适应性(Bauhus et al.，2000)。有研究表明，多种森林植物在土壤水分减少条件下，根系组织密度增大，导致比根长（SRL）减少(Markesteijn & Poorter，2009)，不同植物的 SRL 和 SRA 在不同环境条件下产生的响应存在较大差异。本研究中，辣木在无氮（N0）和低氮（N1）的处理中，粗根的比根长与比表面积随着水分添加量的增加呈现递增趋势，与前人的研究结果一致(白亚梅等，2020)，但随着氮浓度的增加则与该结果产生差异。另有研究表明，在外界水分供给不足时，杉木（*Cunninghamia lanceolata*）通过增大细根的比根长和比表面积以应对土壤水分减少(钟波元等，2016)，也有研究发现杉木幼树会增大比根长以应对干旱条件(吴帆等，2022)。本研究中，辣木的比根长与比表面积在不同水分添加中并没有表现出显著差异，表明辣木根系结构对土壤水分有很广的耐受性；另外也可能是由于本实验采用盆栽实验与杉木的野外实验环境存在不同，野外栽培树种除了受到人工施水灌溉的水分以外，植物还可能会利用自然中土壤深层水分，而辣木盆栽试验中的有限空间环境不利于根系的充分伸展以及生长，进而可能影响植物对水分的利用情况，造成实验结果不一致。土壤水分梯度和氮施加梯度对植物根系的影响是一个综合且复杂的过程，不同植物对于氮浓度以及水量的适应条件也有较大区别。因此，在应对不同的水分和氮添加条件，辣木在 SRL 和 SRA 的变化的反应具有明显差异。在以后的研究中，需要进一步通过长期的大田试验来验证不同水氮组合处理对辣木不同生长时间根系形态特征的影响。

4 结论

综上所述，低氮中水和低氮高水组合对于辣木苗期根系的生长更有利，说明适宜的水氮耦合处理对辣木根系各项指标有促进作用，且有利于辣木幼苗细根生长以及生物量积累。低氮施加更适合辣木粗根生长，随着氮处理水平的提高，在一定程度上会抑制粗根生长。本研究结果对于辣木幼苗栽培的根系生长的水氮耦合调控有一定参考价值，合理的土壤水分供应结合较低的氮素施加能有效改善辣木根系的生长，但水氮

chinaXiv:202205.00007v1

chinaXiv:202205.00007v1

耦合对辣木根系生长仍有待进一步研究。

参考文献:

BAUHUS J, KHANNA PK, MENDEN N. 2000. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*[J]. Can J For Res, 30(12): 1886-1894.

Li WB, Jin CJ, Guan DX, et al., 2015. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: a meta-analysis[J]. Soil Biol Biochem, 82(47): 112-118.

MARKESTEIJN L, POORTER L. 2009. Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought- and shade-tolerance[J]. J Ecol, 97(2): 311-325.

METCALFE DB, MEIR P, ARAGÃO LE, et al., 2008. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest[J]. Plant Soil, 311(1): 189-199.

DAI M, GUO HB, 2020. Effects of water and nitrogen coupling on physiological characteristics and yield of greenhouse cucumber fruit[J]. N Hist, (17): 8-15. [戴明, 郭海滨, 2020. 水氮耦合对温室黄瓜果实生理特性及产量的影响[J]. 北方园艺, (17): 8-15.]

ER C, LIN T, WANG JY, et al.， 2021. Effects of dry matter accumulation and yield components under different irrigation and fertilization treatments[J]. Xinjiang Agric Sci, 58(7): 1187-1196. [尔晨，林涛，王家勇，等，2021. 水氮耦合对棉花干物质积累及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 58(7): 1187-1196.]

GONG SJ, KANG A, CHEN KQ, et al.， 2021. Research progress on nutrition, function and application of *Moringa oleifera* leaves[J]. Sci Technol Food Ind, 42(21): 1-12. [巩思佳, 康澳, 陈可菁, 等, 2021. 辣木叶的营养、功能及应用研究进展[J]. 食品工业科技, 42(21): 1-12.]

HAN XQ, ZHAO G, LIAO CF, et al.， 2018. Effect of soil water stress on biomass allocation and water use efficient in *Moringa oleifera* Lam[J]. Chin J Trop Crop, 39(6): 1045-1049. [韩学琴, 赵广, 廖承飞, 等, 2018. 水分胁迫对辣木生物量分配和水分利用效率的影响[J]. 热带作物学报, 39(6): 1045-1049.]

HAO LF, HAO WY, LIU TY, et al., 2021. Responses of root morphology and nutrient content of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings to nitrogen addition and inoculation treatments[J]. J Beijing For Univ, 43(4): 1-7. [郝龙飞, 郝文颖, 刘婷岩, 等，2021. 氮添加及接种处理对1年生樟子松苗木根系形态及养分含量的影响[J]. 北京林业大学学报, 43(4): 1-7.]

LAO TH, JIANG JH, LI JH， et al.， 2013. Comparative experimental study on determination of soil field water capacity in Nanxiong tobacco area[J]. Modern Agric Sci Technol, 41(1): 208-209. [劳同浩, 姜俊红, 李就好, 等，2013. 南雄烟区土壤田间持水量测定对比试验研究[J]. 现代农业科技, 41(1): 208-209.]

LIU GJ, KONG QX, SU SB，2009. Study progress on maize nitrogen metabolism[J]. J Maize Sci, 17(1): 135-138. [刘弋菊, 孔箐锌, 苏胜宝, 2009. 玉米氮素代谢机制的研究进展[J].玉米科学, 17(1): 135-138.]

REN BL, GENG JJ, Lv Y, et al., 2021. Physiological response and tolerance evaluation to waterlogging in moringa at seedling stage[J]. J N Agric, 52(3): 789-796. [任保兰, 耿建建, 吕亚, 等, 2021. 辣木幼苗对淹水胁迫的生理响应及耐涝性综合评价[J]. 南方农业学报, 52(3): 789-796.]

WANG B, NIE D, ZHAO YF, et al., 2020. The effects of water-nitrogen coupling on yield, nitrogen and water use efficiency of quinoa[J]. J Irr Drain, 39(9): 87-94. [王斌, 聂督, 赵圆峰, 等, 2020. 水氮耦合对藜麦产量、氮素吸收和水氮利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 39(9): 87-94.]

WANG S, YIN J, ZHANG HJ, et al., 2021. Effects of different water and nitrogen treatments on soil enzyme activity and yield of potato[J]. Water Sav Irr, 46(8): 67-73. [王顺, 尹娟, 张海军, 等, 2021. 不同水氮处理对马铃薯土壤酶活性和产量的影响[J]. 节水灌溉, 46(8): 67-73.]

WANG WN, WANG Y, WANG SZ, et al., 2016. Effects of elevated N availability on anatomy，morphology and mycorrhizal colonization of fine roots[J]. Chin J Appl Ecol, 27(4): 1294-1302. [王文娜, 王燕, 王韶仲, 等, 2016. 氮有效性增加对细根解剖、形态特征和菌根侵染的影响[J]. 应用生态学报, 27(4): 1294-1302.]

WANG YC, HE XC, WANG ZY, et al., 2021. Effects of water and nitrogen coupling on water consumption and soil moisture of *Isatis indigotica*[J]. Agric Eng, 11(9): 47-54. [王玉才, 何秀成, 王泽义, 等, 2021. 水氮耦合

chinaXiv:202205.00007v1

对菘蓝耗水和土壤水分的影响[J]. 农业工程, 11(9): 47-54.]

WU F, Xiong DC, ZHOU JC, et al., 2022. Effects of warming and precipitation exclusion on fine root biomass, morphology and nutrient characteristics of *Cunninghamia lanceolata* saplings[J]. J Trop Subtrop Bot: 1-10. [吴帆, 熊德成, 周嘉聪, 等, 2022. 增温及隔离降水对杉木幼树细根生物量、形态及养分特征的影响[J]. 热带亚热带植物学报:1-10.]

YUAN SN, TU HQ, PAN J, et al., 2021. Effects of shading on the plant growth and leaf mineral elements contents of *Moringa oteifera* Lam[J]. J Fujian Agric and For Univ (Nat Sci), 50(1): 79-84. [袁淑娜, 涂寒奇, 潘剑, 等, 2021. 遮光对辣木幼苗生长及叶片矿质元素含量的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版), 50(1): 79-84.]

BAI YM, LI Y, SHAN LS, et al., 2020. Effects of precipitation change and nitrogen addition on root morphological characteristics of *Reaumuria soongorica*[J]. Arid Zone Res, 37(5): 1284-1292. [白亚梅, 李毅, 单立山, 等, 2020. 降水变化和氮添加对红砂幼苗根系形态特征的影响[J]. 干旱区研究, 37(5): 1284-1292.]

CHENG SM, HUANG LN, ZHAO ZX, et al., 2021. Effects of NPK fertilization dosages on the growth and nutrient accumulation of *Moringa oleifera*[J]. J Yunnan Agric Univ (Nat Sci), 36(1): 147-154. [程世敏, 黄丽娜, 赵增贤, 等, 2021. 氮磷钾施用量对辣木生长及养分累积的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 36(1): 147-154.]

LI CP, LI SW, DING JJ, et al., 2019. Effects of nitrogen application levels on respiration rate and related enzyme activity of walnut Root[J]. For Res, 32(6): 56-62. [李春萍, 王世伟, 丁俊杰, 等, 2019. 施氮水平对核桃细根呼吸速率及相关酶活性的影响[J]. 林业科学研究, 32(6): 56-62.]

LI X, 2016. Effects of coupling water and nitrogen on root physio-ecological indices of different drought-resistant adzuki beans[D]. Linfen: Shanxi Normal University：58.[李鑫, 2016. 水氮耦合对不同耐旱性红小豆根系生理生态指标的影响[D]. 临汾: 山西师范大学: 58]

LIU FM, JIANG J, LIU GF, 2015. Effects of fertilization on the growth and flowering of *Betula platyphylla*[J]. J NW For Univ, 30(2): 116-120. [刘福妹, 姜静, 刘桂丰, 2015. 施肥对白桦树生长及开花结实的影响[J]. 西北林学院学报, 30(2): 116-120.]

PENG TT, BIAN SF, ZHANG LH, et al., 2014. Effect of water and nitrogen regulation on maize root and yield[J]. J Jilin Agric Sci, 39(5): 53-57. [彭涛涛, 边少锋, 张丽华, 等, 2014. 水氮调控对玉米根系及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 39(5): 53-57.]

PENG ZT, LIN JN, LIU L, et al., 2021. The coupling effects of water and nitrogen addition on the growth characteristics of *Moringa oleifera*[J]. Chin J Ecol, 40(2): 363-372. [彭钟通, 林佳娜, 刘丽, 等, 2021. 水氮耦合对辣木生长特性的影响[J]. 生态学杂志, 40(2): 363-372.]

RAO ZK, FENG LY, LI C, et al., 2007. Study on nutrients of *Moringa oleifera*[J]. Mod Instr, 13(2): 18-20. [饶之坤, 封良燕, 李聪, 等, 2007. 辣木营养成分分析研究[J]. 现代仪器, 13(2): 18-20.]

SUN YJ, SUN YY, LI XY, et al, 2009. Relationship of activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water-nitrogen interaction[J]. Acta Agr Sin, 35(11): 2055-2063. [孙永健, 孙园园, 李旭毅, 等, 2009. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. 作物学报, 35(11): 2055-2063.]

WEI AC, ZHANG DW, 2021. The photosynthetic characteristics of *Moringa oleifera* seedlings[J]. For Sci Technol, 64(5): 21-26. [魏安超, 张大为, 2021. 不同年龄辣木幼苗光合特性[J]. 林业科技通讯, 64(5): 21-26.]

WU YB, FENG ZJ, 2006. Rare and endangered plants and national key protected plants for ex situ conservation in South China Agricultural University arboretum[J]. J South Chin Agric Univ, 27(3): 118-121. [吴永彬, 冯志坚, 2006. 华南农业大学树木园稀有濒危植物和国家重点保护植物的迁地保护[J]. 华南农业大学学报, 27(3): 118-121.]

XIE ZL, TIAN CY, 2011. Coupling effects of water and nitrogen on dry matter accumulation, nitrogen uptake and water-nitrogen use efficiency of cotton under mulched drip irrigation[J]. Plant Nut Fer Sci, 17(1): 160-165. [谢

ChinaXiv合作期刊

志良，田长彦, 2011. 膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 17(1): 160-165.]

YAO FX，2011. Studies on physiolological mechanism of rice growth and water-and nitrogen use efficiency under different water and nitrogen regimes[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture Univesity：145. [姚锋先, 2011. 不同水氮管理对水稻生长和水氮效率影响的生理机制研究[D]. 武汉：华中农业大学: 145]

ZHONG BY, XIONG DC, SHI SZ, et al., 2016. Effects of precipitation exclusion on fine-root biomass and functional traits of *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J]. Chin J Appl Ecol, 27(9): 2807-2814. [钟波元，熊德成，史顺增，等, 2016. 隔离降水对杉木幼苗细根生物量和功能特征的影响[J]. 应用生态学报, 27(9): 2807-2814.]

ZHOU W, LIU N, LIU LJ, et al., 2017. Antioxidant activity of ethanol extract from *Moringa oleifera* leaves[J]. Mod Food Sci Technol, 33(10): 149-156. [周伟，刘能，林丽静，等, 2017. 辣木叶乙醇提取物的抗氧化活性研究[J]. 现代食品科技, 33(10): 149-156.]

DAI M, ZHANG YM, 2020. Effects of coupling of water and nitrogen on the accumulation of soil nitrogen in root zone and yield of rice[J]. Res Soil Water Conser, 27(3): 168-173. [戴明，张一敏, 2020. 水氮耦合对水稻根区土壤氮素累积及其产量的影响[J]. 水土保持研究, 27(3): 168-173.]

LI L, YING ZH, YA HJ, et al., 2015. Influence of N, P, K, Ca deficiency on growth of *Moringa oleifera* lam seedlings[J]. Chin Agric Sci Bull, 31(16): 52-56. [李玲，殷振华，亚华金，等, 2015. N、P、K、Ca缺素培养对辣木幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 31(16): 52-56.]

SHI SZ, XIONG DC, DENG F, et al., 2017. Interactive effects of soil warming and nitrogen addition on fine root production of Chinese fir seedlings[J]. Chin J Plant Ecol, 41(2): 186-195. [史顺增，熊德成，邓飞，等, 2017. 土壤增温、氮添加及其交互作用对杉木幼苗细根生产的影响[J]. 植物生态学报, 41(2): 186-195.]

YOSHIMURA K, MASUDA A, KUWANO M, et al., 2007. Programmed proteome response for drought avoidance/tolerance in the root of a C3 xerophyte (wild watermelon) under water deficits[J]. Plant Cell Physiol, 49(2): 226-241.

chinaXiv:202205.00007v1